

Эксилампа с коаксиальной линией передачи

© Д.В. Шитц,¹ В.О. Нехорошев,² В.В. Савин¹

¹ Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, 236041 Калининград, Россия

² Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия
e-mail: DSchitz@kantiana.ru

(Поступило в Редакцию 31 марта 2015 г.)

Представлена математическая модель электрофизических процессов, происходящих в системе, состоящей из транзисторного инвертора, колебательного контура, повышающего трансформатора, длинной линии и лампы барьерного разряда. Предложен и опробован способ эффективной передачи высоковольтного высокочастотного напряжения от источника питания к лампе барьерного разряда через длинную коаксиальную линию, где напряжение на электроды лампы подавалось в виде пачек гармонического напряжения с частотой, близкой к собственной резонансной частоте системы возбуждения.

Введение

Эксилампы — класс газоразрядных источников спонтанного узкополосного излучения, которое продуцируется при распаде эксимерных или эксиплексных молекул (отсюда название — эксилампы). Эти процессы происходят в рабочем газе или смесях газов, возбуждаемыми барьерным, емкостным или тлеющим разрядом [1]. Для поддержания устойчивого горения барьерного разряда на электроды лампы подаются импульсы напряжения амплитудой несколько киловольт с частотой следования несколько десятков килогерц.

Одной из первых исследований электрических процессов в схемах возбуждения барьерным разрядом было представлено в работах [2,3], где предложена эквивалентная схема замещения барьерного разряда, содержащая источник напряжения возбуждения $U(t)$, емкости барьеров C_b (которые в общем случае нелинейные), емкость газоразрядного промежутка C_g и нелинейное активное сопротивление плазмы R_{pl} . Такая несложная модель пригодна для оценки энергоклада в разряд при интерпретации экспериментально полученных экспериментальных данных.

Традиционно для возбуждения активных сред эксиламп барьерного разряда используется либо напряжение гармонической формы [4], либо импульсное напряжение, близкое по форме к прямоугольному [5]. В конструкции ламп барьерного разряда, где требуется питание излучателя через длинную коаксиальную линию, возбуждение субмикросекундными фронтами импульсов неприемлемо, так как в данном случае линия является существенной реактивной нагрузкой для импульсных источников, что значительно снижает КПД устройства „источник питания и излучатель“ в целом.

Описание математической модели

Для анализа электрических процессов, происходящих при возбуждении активной среды, необходимо рас-

смотрение схемы замещения системы возбуждения, где помимо электрических параметров барьерного разряда включаются также элементы инвертора, повышающего импульсного трансформатора и параметры передающей линии.

В представленной на рис. 1 модели: $U(t)$ — источник переменного напряжения, имитирующий идеальный DC–AC-преобразователь, L_s — суммарная индуктивность резонансного дросселя и цепей инвертора, а C_u — дополнительный разделительный конденсатор для устранения постоянной составляющей на выходе инвертора, r_{lss} — суммарное сопротивление потерь, которое складывается из сопротивления проводов, монтажа, обмотки дросселя и учитывает падение напряжения на открытом ключе инвертора. В моделировании использована полная электрическая схема замещения импульсного трансформатора с сосредоточенными параметрами, работающего в линейном режиме, содержащая приведенные к первичной цепи индуктивности рассеяния трансформатора (L_{s1}, L_{s2}), индуктивность намагничивания (L_u), паразитные емкости (C_{s1}, C_{s2}) и активные потери в сердечнике (r_u), первичной и вторичной обмотках (r_1, r_2). Емкость C_{s2} учитывает суммарную емкость вторичной обмотки, но может включать в себя емкость разъемов, паразитную емкость на землю, пробников и длинной линии.

Для полученной электрической эквивалентной схемы замещения проведен частотный анализ, в частности рассчитывались АЧХ и комплекс входного сопротивления цепи:

$$W_{pl}(s) = \frac{U_{pl}(s)}{U(s)}$$

— передаточная характеристика в области изображений,

$$W_p(f) = |W_{pl}(2\pi i f)|$$

— передаточная характеристика в частотной области (АЧХ).

В широком диапазоне параметров, характерных для реальных схем, АЧХ системы имеет характерную осо-

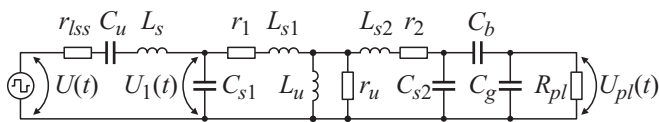


Рис. 1. Полная электрическая схема замещения.

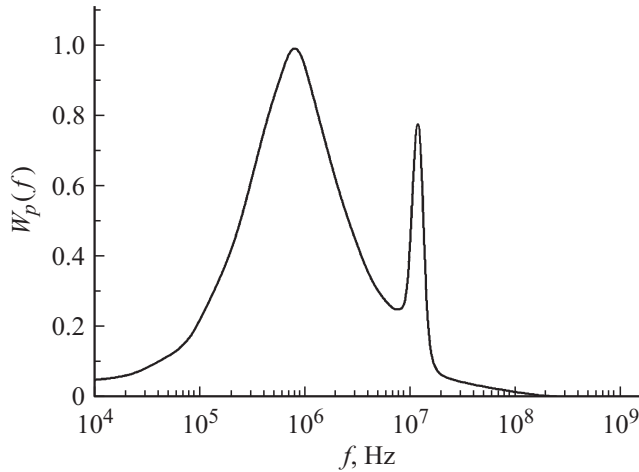


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика исследуемой схемы замещения.

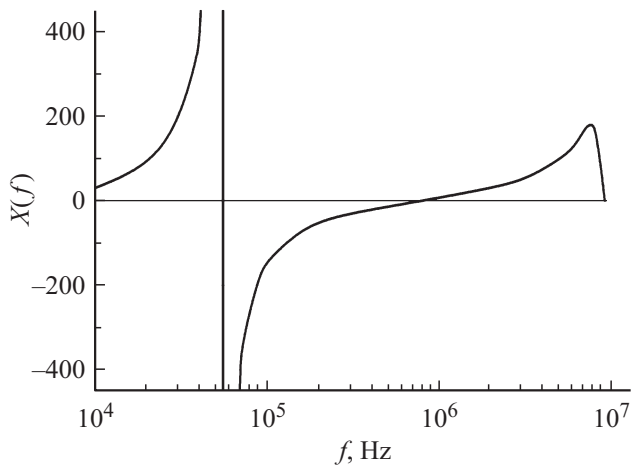


Рис. 3. Поведение мнимой части импеданса системы.

бенность — выраженный максимум в области частот 0.5–2 МГц (рис. 2).

В ходе моделирования показано, что спад АЧХ в области низких частот обусловлен влиянием барьерной емкости C_b , а спад в области верхних частот — влиянием паразитных индуктивностей и емкостей. Таким образом, частотный анализ схемы указывает на наличие у системы выраженных частотно-избирательных свойств.

На практике особенно интересен режим с компенсацией реактивной мощности, которому соответствует нуль функции $X(f) = \text{Im}[Z_{in}(2\pi if)]$, где $Z_{in}(2\pi if)$ — комплекс входного сопротивления (импеданс) системы (рис. 3).

Из рассмотрения зависимости $X(f)$ следует, что существует частота, на которой входной импеданс системы имеет практически активный характер, т.е. возможно согласование источника сигнала и нагрузки, отделенной от него барьером. Результаты моделирования схемы с повышающим импульсным трансформатором свидетельствуют о возможности достижения высокой эффективности передачи энергии через длинную линию и диэлектрический барьер. С точки зрения передачи энергии идеальным является возбуждение гармоническим сигналом частотой f_{res} , попадающей в максимум АЧХ системы.

Другими словами, для эффективной передачи энергии возбуждения от источника питания в газовый разряд необходимо генерировать гармоническое напряжение возбуждения с вполне определенной частотой, при этом нагрузка будет согласована. Под согласованием понимается режим, когда реактивная мощность, циркулирующая в паразитных емкостях, будет по большей части скомпенсирована действием индуктивностей L_s, L_{s1}, L_{s2}, L_u .

Однако на практике сформировать гармонические непрерывные колебания амплитудой 2–5 кВ и частотой единицы МГц сложно с технической точки зрения, к тому же такой способ питания ламп барьерного разряда имеет существенный недостаток — значительно меньшую эффективность возбуждения лампы, что связано с отсутствием паузы тока, необходимой для релаксации плазмы в газоразрядном промежутке [6]. Увеличение эффективности при импульсном возбуждении эксиламп при наличии паузы между импульсами длительностью намного большей длительности импульсов имеет место благодаря формированию оптимальной функции распределения электронов по энергии и минимизации упругих и неупругих потерь энергии электронов в процессах, не приводящих к образованию эксимерных молекул [1].

В результате можно сформировать ряд требований, предъявляемых к форме (спектральному составу) сигнала источника возбуждения:

- 1) основная доля энергии сигнала должна быть сосредоточена в относительно узкой полосе частот, совпадающей с полосой пропускания фильтра, образованного элементами схемы замещения системы;
- 2) должны выполняться определенные условия на величину скорости нарастания напряжения, тока и их амплитуду для эффективного возбуждения рабочего газа;
- 3) необходимость наличия паузы тока не менее 10 μ s для релаксации плазмы.

При выполнении этих требований возможно получение квазирезонансного режима работы схемы, который характеризуется высокой эффективностью передачи энергии и компенсацией большей части реактивной мощности, циркулирующей в разрядном контуре, что важно при практической реализации источников питания. К тому же особенностью такого режима является коммутация ключей инвертора при близком к нулю значении тока, что ведет к значительному уменьшению динамических потерь в преобразователе.

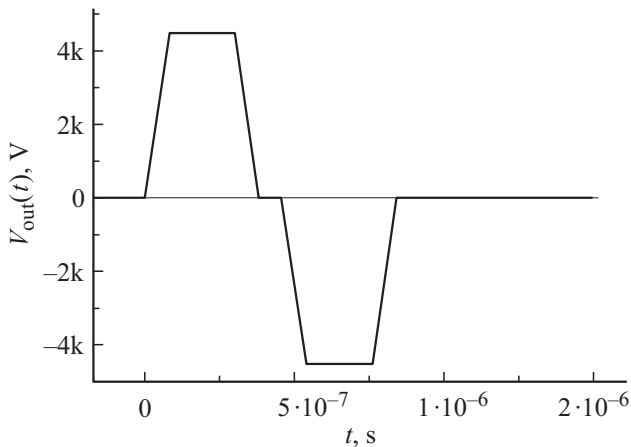


Рис. 4. Эпюры модельных импульсов напряжения.

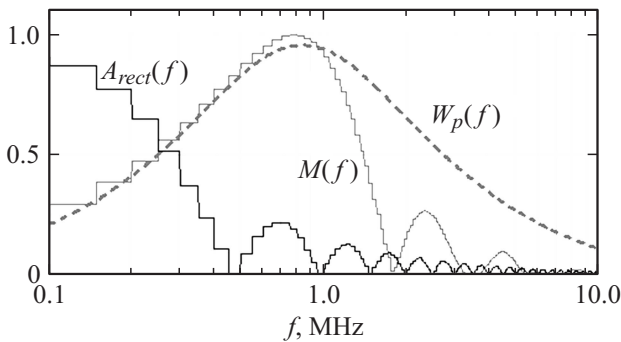


Рис. 5. Нормированные спектры напряжений возбуждения и АЧХ исследуемой системы.

Для удовлетворения всех вышеперечисленных условий на вторичной обмотке импульсного трансформатора необходимо сформировать пачку импульсов гармонического напряжения с резонансной частотой системы f_{res} , состоящую из четного числа периодов колебания напряжения.

На рис. 4 показаны эпюры модельных импульсов напряжения $V_{out}(t)$ на выходе инвертора, которые могут быть получены на практике при использовании транзисторных преобразователей напряжения.

Для данного периодического сигнала с помощью преобразования Фурье определен амплитудно-частотный спектр $M(f)$ (рис. 5).

Несмотря на то что данный спектр далек от спектра гармонического сигнала одной частоты, он имеет выраженную полосу частот, несущих основную энергию, и при этом возможно реализовать управление инвертором для получения такой формы напряжения на выходе.

При сравнении спектра $M(f)$ предлагаемого сигнала $V_{out}(t)$, АЧХ системы $W_p(f)$ и спектра прямоугольного импульса напряжения $A_{rect}(f)$ (длительность импульса $2\mu s$, частота 100 kHz , время нарастания и спада $\sim 250\text{ ns}$) в одной системе координат (рис. 5) видно, что прямоугольные импульсы имеют мало подходящих

(полезных) гармоник, и основная энергия сосредоточена в первой гармонике, которая даже при частоте следования импульсов $100\text{--}200\text{ kHz}$ далека от максимума АЧХ системы $W_p(f)$. Предлагаемый биполярный сигнал $M(t)$ с периодом $t_p \sim 1/2f_{res}$ имеет явное преимущество, поскольку его основная энергия сосредоточена в гармониках, попадающих в полосу пропускания фильтра, образованного элементами исследуемой системы. Это значит, что и амплитуда соответствующих спектральных составляющих напряжения на нагрузке, равная произведению величины амплитуды гармоники и значения передаточной функции на соответствующей ей частоте, также будет больше.

Схема резонансного источника питания

На рис. 6 приведены функциональная схема разработанного резонансного источника питания с коаксиальной длинной линией и функциональная схема блока управления транзисторами преобразователя.

Полумостовой инвертор, собранный на транзисторах, нагружен на колебательный контур, состоящий из дросселя L_{res} , трансформатора, коаксиальной линии и эксилампы. С помощью емкостного делителя напряжения $C_{d1}\text{--}C_{d2}$ и шунта R_s регистрировались напряжение и ток эксилампы.

Схема управления была выполнена на КМОП-микросхемах с триггерами Шмидта на входах с целью повышения помехоустойчивости. Генератор синхроимпульсов „Clock“ задает частоту следования пачек импульсов. Тактовый сигнал подается на RS-триггер „Flip-Flop“ (рис. 6). Выход RS-триггера устанавливается в логическое состояние „1“ при поступлении импульса управления и переходит в состояние „0“ по отсчету заданного числа периодов внутри пачки импульсов. Генератор импульсов „Multivibrator“, управляемый от RS-триггера, определяет длительность и частоту следования импульсов внутри

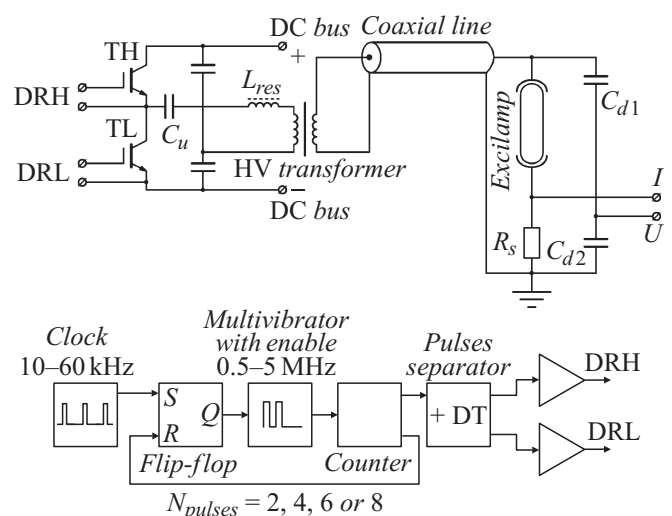


Рис. 6. Функциональная схема источника питания.

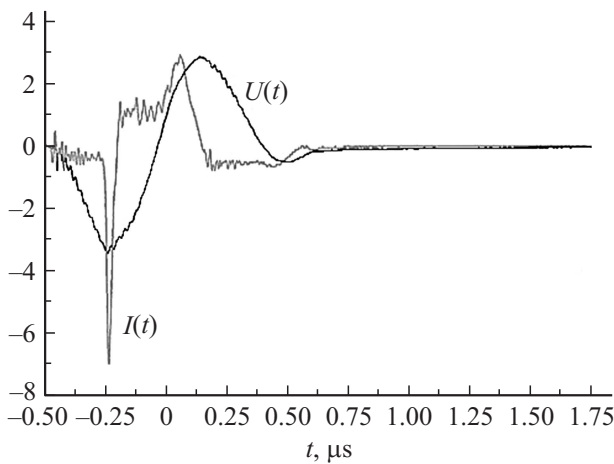


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения и тока при возбуждении эксилампы от источника квазисинусоидальных импульсов напряжения.

пачки. Далее счетчик импульсов „Counter“ формирует сигнал четности количества периодов, а распределитель фазы „Pulses separator“ чередует подачу сигнала управления на оба транзистора. Драйверные схемы управления транзисторов DRH и DRL усиливают поступающий на них сигнал.

Таким образом, схема управления позволяла получать импульсы на затворах транзисторов амплитудой 16 В с длительностью $t_p = 50\text{--}800\text{ ns}$ и частотой $f_p = 0.5\text{--}5\text{ MHz}$ при длительности защитной паузы t_d (dead time) — $80\text{--}200\text{ ns}$. Импульсы генерировались в виде пачек от 1 до 4 периодов в пачке, частота пачек f_b изменялась в диапазоне $10\text{--}60\text{ kHz}$. При подаче пачки импульсов на затворы транзисторов на нагрузку (электродах эксилампы) генерировались пачки импульсов гармонического напряжения амплитудой до 4 кВ.

На резонансной частоте реализован режим передачи энергии в активное сопротивление плазмы барьерного разряда через длинную коаксиальную линию длиной до 7.5 м (данная длина кабеля не является предельной). Регулировка паузы между импульсами возбуждения позволяет достичь необходимой степени релаксации плазмы в газоразрядном промежутке, т.е. подобрать оптимальную предимпульсную концентрацию электронов в плазме $n_e(0)$. В данном случае это условие выполнялось при возбуждении на частоте $f_b = 15\text{ kHz}$ одним биполярным импульсом с $t_p \sim 250\text{ ns}$, что соответствует резонансной частоте системы $f_p \sim 2\text{ MHz}$ (рис. 7).

Достичь высокой резонансной частоты позволяют особенности конструкции эксилампы и импульсного трансформатора. Для этого применена комбинация мер по снижению индуктивностей рассеяния в совокупности с уменьшением распределенных емкостей. В подавляющем большинстве других публикациях о резонансных источниках возбуждения для эксиламп схожего диапазона мощностей приведены значения резонансной частоты порядка 1 МГц и ниже [7].

Результаты экспериментов

В экспериментах использовалась отпаянная ХеСl-эксилампа барьерного разряда с параметрами смеси Хе/Сl = 200/1 и общем давлении 102 Торг с площадью излучающей поверхности 155 cm^2 . Оптимизация состава и давления рабочего газа осуществлялась до отпайки лампы при использовании источника питания с однополярными квазипрямоугольными импульсами на выходе без использования коаксиальной линии. В качестве коаксиальной длинной линии служил кабель РК-50-4-11 длиной 2.5, 5 и 7.5 м. Мощность потребления источника питания от сети рассчитывалась путем перемножения среднеквадратичных значений тока и напряжения, измеренных на входе источников питания. Мощность УФ-излучения P_{rad} контролировалась фотоприемником Hamamatsu H8025-222. Мощность возбуждения эксилампы P_{ex} рассчитывалась из осциллограмм тока и напряжения на электродах эксилампы по методике, описанной в [3]. Эффективность излучения эксилампы находилась как отношение мощности УФ-излучения к полному энергозатрату в разряд за единицу времени: $n_{rad} = P_{rad}/P_{ex}$.

Опыт показывает, что при питании эксиламп от генератора высоковольтных квазипрямоугольных импульсов с линией длиной 50 см и более возникают импульсы коммутационных токов транзисторов амплитудой десятки ампер, что приводит к резкому увеличению потерь мощности и напряжения на выходе такого источника питания. При сравнении эффективности двух источников питания при возбуждении эксилампы через коаксиальную линию длиной 2.5 м квазирезонансный источник питания работал с эффективностью, примерно в 2 раза большей, чем при питании однополярными квазипрямоугольными импульсами (рис. 8).

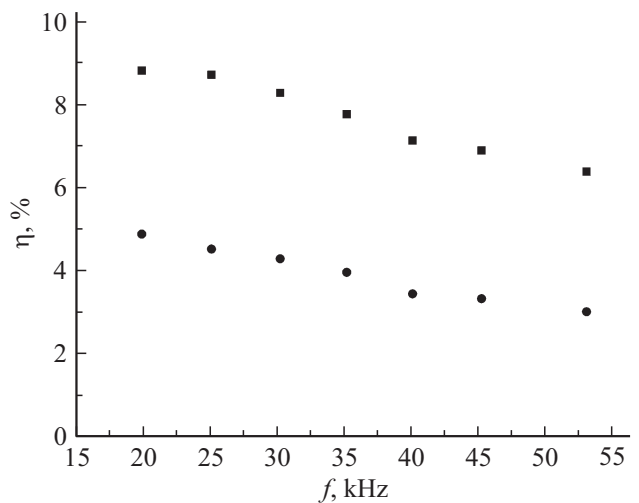


Рис. 8. Эффективность преобразования электрической энергии в световую при питании эксилампы через коаксиальную линию от квазирезонансного источника питания (■) и квазипрямоугольными импульсами (●).

Увеличение количества периодов в пачке импульсов приводит к снижению эффективности излучения эксилампы вследствие перевозбуждения активной среды рабочего газа даже при низких частотах следования пачек.

Заключение

Предложенное техническое решение позволяет передавать высоковольтные импульсы возбуждения через длинный коаксиальный кабель с минимальными потерями, при этом КПД эксилампы близок к КПД при ее возбуждении импульсами квазипрямоугольной формы без длинной линии. Использование резонансной топологии импульсного преобразователя обеспечивает коммутацию при нуле тока при включении (ZCS) и коммутацию при нуле напряжения при выключении ключей (ZVS), что ведет к снижению потерь при коммутациях и повышению электрического КПД и $\cos \varphi$ источника возбуждения с длинной линией передачи.

Следует отметить, что при работе в практически важном диапазоне частот достигнутые величины эффективности излучения $\eta_{rad} \sim 9\%$ (при $f_b = 20$ kHz и линией длиной 2.5 m), что в 1.8 раза выше, чем при возбуждении от генератора импульсов квазипрямоугольной формы, применяемого для возбуждения ХеСl-эксиламп.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (НИР № 2014/60/2809) „Разработка комплекса приборов для применения в медицине“, финансируемого Министерством образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. // УФН. 2003. Т. 173. Вып. 2. С. 201–217.
- [2] Liu S., Neiger M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 3144–3150.
- [3] Ломаев М.И. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. Вып. 1. С. 1091–1095.
- [4] Godoy-Cabrera O., Benitez-Read J.S., Lopezcallejas R., Pacheco-Sotelo J. // Int. J. Electron. 2000. Vol. 87. N 3. P. 361–376.
- [5] Mildren R.P., Carman R.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. L1–L6.
- [6] Lomaev M.I., Schütz D.V., Skakun V.S., Tarasenko V.F. // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4460. P. 38–45.
- [7] Bonnin X., Brandelero J., Videau N., Piquet H., Meynard T. // IEEE T. Power Electron. 2014. Vol. 29. N 8. P. 4261–4269.